



بررسی سرعت و هندسه میکسر بر نحوه توزیع جریان در یک راکتور صنعتی

سید محمد حسن موسوی زاده^۱، دکتر مهدی حمزه‌ای^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*نویسنده مسئول: mahdi.hamzei@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷

چکیده

در این مقاله، به بررسی سه‌بعدی جریان سیال درون یک مخزن همزن دار درون یک راکتور صنعتی جهت بررسی توزیع سرعت پرداخته شده است. برای مدل‌سازی مخزن همزن دار و پره‌های آن ابتدا ساختار هندسه به دقت مطالعه شده سپس با استفاده از نرم افزار سالیدورکز مدل‌سازی هندسه انجام شده است سپس هندسه تولید شده درون نرم‌افزار انسیس وارد شده است. پس از آن مش بندی انجام شده و سپس شرایط مرزی مناسب روی مخزن همزن دار و پره‌های آن اعمال شده است. در این پژوهش، از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST بهره گرفته شده است. در این تحقیق، برای شبکه‌بندی از تولید شبکه بدون سازمان استفاده شد که میانگین کیفیت شبکه، نسبت منطری و کشیدگی برای شبکه محاسباتی مخزن دارای همزن لنگری ۰/۸۴، ۱/۸۴ و ۰/۲۲ بدست آمد. میانگین کیفیت شبکه، نسبت منطری و کشیدگی برای شبکه محاسباتی مخزن بافل‌دار و همزن جدید ۰/۸۴، ۱/۸۴ و ۰/۲۳ بدست آمد. همچنین میدان جریان درون یک مخزن همزن دار دارای بافل به ازای سرعت‌های زاویه‌ای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دور در دقیقه برای دو نوع همزن شبیه‌سازی شد. در نهایت مشخص گردید که همزن جدید در نواحی کف مخزن عملکرد بسیار بهتری نسبت به همزن لنگری دارد.

کلمات کلیدی: CFD، مدل‌سازی، راکتور صنعتی، هیدرودینامیک، مخزن همزن

مقدمه

راکتور یک ظرف یا محفظه با شکل‌های مختلف می‌باشد که در آن واکنش شیمیایی صورت می‌گیرد و در آن مواد ورودی به محصولات تبدیل می‌شوند: که به دو دسته پلیمری و غیرپلیمری تقسیم می‌شوند. واکنش‌های شیمیایی که در داخل راکتور صورت می‌گیرند به دو دسته کلی متجانس و نامتجانس تقسیم‌بندی می‌شوند. واکنش‌های متجانس واکنش‌هایی هستند که در آن تمام ترکیب شوندگان در یک فاز که ممکن است گاز، مایع و یا جامد باشد، موجود هستند. راجاواتساوای و همکاران [۱] مطالعه کمی و کیفی بر روی تشکیل رسوب در مخازن همزن انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که یک مخزن هدفمند که می‌تواند به ۹ بخش از جمله یک پایه، چهار دیواره و چهار بافل یا چهار قطعه خالی جدا شود، نتایج توزیع رشد مقیاس کمی را هنگام اسکن یک بخش دیوار با استفاده از CMM (دستگاه اندازه‌گیری مختصات) ارائه می‌دهد. مارکوز بانوس و همکاران [۲] یک مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی به منظور تعیین منطقه موثر که در آن ثابت متزن-اتو را می‌توان به طور مستقیم از شبیه‌سازی‌های جریان غیرنیوتنی برای یک توربین چهار پره ۴۵ درجه محاسبه کرد، انجام دادند. لیانگچولی و همکاران [۳] شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی ویژگی‌های مصرف برق گذرا در یک مخزن همزن نشده، انجام دادند. براساس مطالعات آنها میدان جریان گذرا در مخزن همزن با استفاده از مدل آشفته انتقال تنش برشی $k-\omega$ شبیه‌سازی شد. ژانگ و همکاران [۴] ویژگی‌های اختلاط در یک ظرف مجهز به همزن

¹ Coordinate-measuring machine



استوانه‌ای به صورت تجربی و عددی در یک مخزن بدون بافل بررسی کردند. براساس بررسی آنها همزن سیلندر یک استوانه با چهار دهانه و چهار پانل بال است که به طور متقارن توزیع شدند. داوودی و همکاران [۵] یک بررسی کیفی و کمی در مورد تشکیل رسوب در مخازن اختلاط انجام دادند. براساس مطالعه آنها ساخت یک مخزن هدفمند که می‌توان آن را به ۹ بخش جدا کرد (شامل یک پایه، چهار دیوار، و چهار بافل یا چهار قطعه خالی) امکان اندازه‌گیری ضخامت مقیاس در مناطق بحرانی مانند ناحیه پروانه را فراهم کرد. بلیاتسیو و همکاران [۶] بررسی بر تنش هیدرومکانیکی یک پارامتر حیاتی برای طیف وسیعی از فرآیندهای چند فازی در زمینه مهندسی شیمی انجام دادند. آنها تأثیر نوع پروانه و هندسه بر تنش هیدرومکانیکی در مخازن همزن حایز اهمیت بود را بررسی کردند.

معادلات حاکم

برای ایجاد شکل هندسی، مش‌بندی و نمایش نتیجه‌ها، از نرم‌افزارهای تجاری موجود استفاده شده است. معادله‌های بقا برای جریان تراکم پذیر تحت تأثیر آشفستگی به صورت زیر در می‌آید [۷]:

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

معادله‌های رینولدز

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + \\ \left[-\frac{\partial(\rho u'^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho w' u')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \rho u' w')}{\partial z} \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + \\ \left[-\frac{\partial(\rho u' v')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u'^2)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \rho y w')}{\partial z} \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + \right. \\ \left. \left[\frac{\partial(\rho u' w')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v' w')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \rho w'^2)}{\partial z} \right] + S_{Mz} \right] \end{aligned}$$

مدل k-ε معادله‌های زیر را برای پارامترهای آشفستگی در نظر می‌گیرد:

$$\begin{aligned} \mu_{eff} = \mu + \mu_T, \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + G - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$



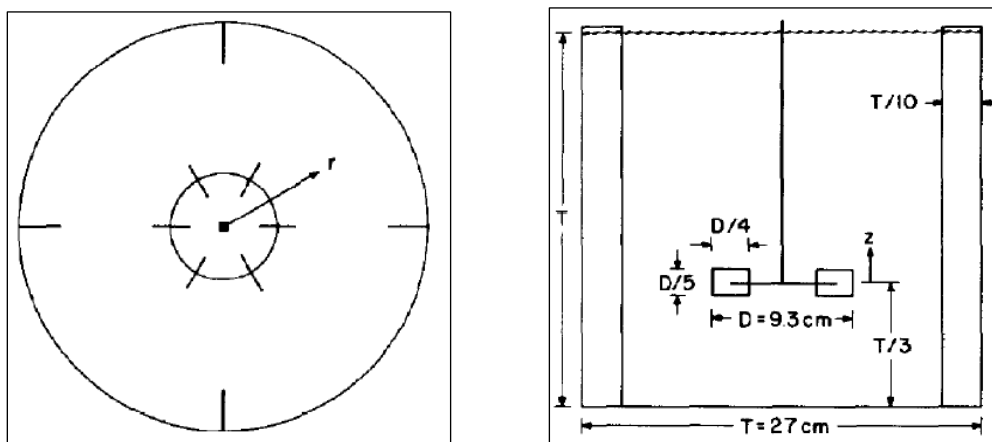
$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] + \quad (5)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_{eff} E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

شبیه سازی

اعتبارسنجی

در این قسمت نتایج حل عددی، با مدل باساوارچا^۱ و همکاران [۸] مقایسه گردیده است تا از نتایج بدست آمده از حل عددی در نرم‌افزار فلونت اطمینان حاصل شود. در شکل (۱) هندسه بکار رفته در مقاله تجربی پرداخته شده است.



شکل ۱: هندسه مقاله تجربی

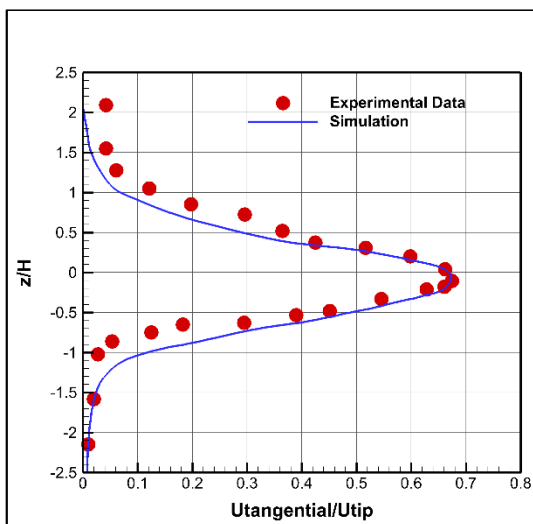
سرعت زاویه‌ای پروانه ۲۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. در این قسمت جهت مقایسه نتایج حل عددی با داده‌های نتایج تجربی از نمودارهای سرعت مماسی و سرعت شعاعی بدون بعد استفاده شده است. سرعت‌های بدون بعد به صورت سرعت مورد نظر تقسیم بر سرعت نوک^۲ پروانه تعریف شده‌اند. در شکل (۲) صحت‌سنجی نتایج حل عددی با داده‌های تجربی با استفاده از سرعت شعاعی بدون بعد و در شکل (۳) صحت‌سنجی نتایج حل عددی با داده‌های تجربی با استفاده از سرعت مماسی بدون بعد [۸] آورده شده است. بررسی نمودارها نشان‌دهنده دقت بالای مدل انتخابی جهت شبیه‌سازی جریان درون مخزن می‌باشد.

هندسه مورد بررسی

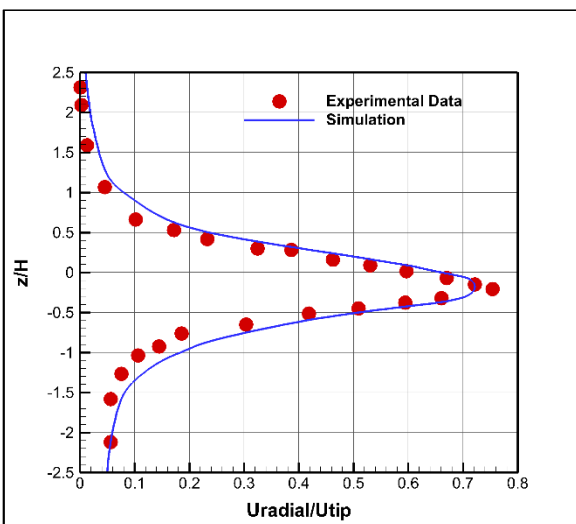
در این پژوهش به بررسی تاثیر سرعت و هندسه میکسر بر نحوه توزیع جریان در یک راکتور صنعتی پرداخته شده است. با توجه موضوع مورد بحث در ابتدا هندسه با استفاده از نرم‌افزار سالدورکز ترسیم شد. سپس هندسه ترسیم شده را به نرم‌افزار انسیس جهت اصلاح و مونتاژ اجزا راکتور منتقل گردید.

¹ Basavarajappa

² Tip Velocity

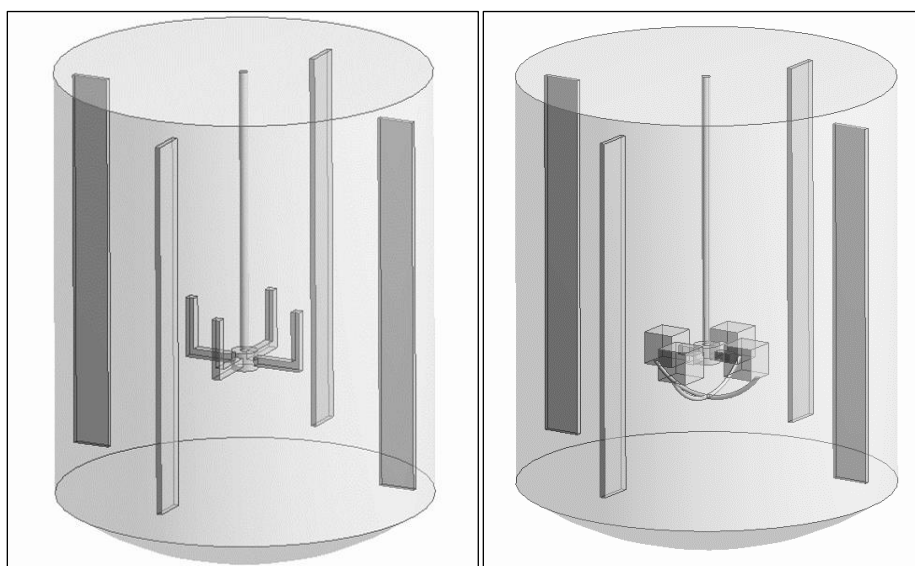


شکل ۳: صحت‌سنجی نتایج حل عددی با داده‌های تجربی با استفاده از سرعت مماسی بدون بعد [۸]



شکل ۴: صحت‌سنجی نتایج حل عددی با داده‌های تجربی با استفاده از سرعت شعاعی بدون بعد [۸]

در شکل (۴) شماتیک کامل از هندسه مخزن بافل‌دار با همزن لنگری و همزن جدید با لوله اسپیرال تولید شده و منتقل شده به نرم‌افزارهای مذکور نشان داده شده است.



شکل ۵: هندسه مخزن بافل‌دار با میکسرهای لنگری و جدید

استقلال حل از شبکه

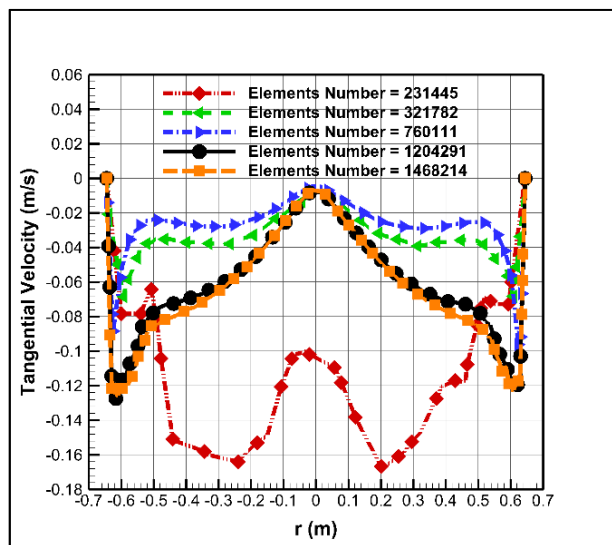
برای بررسی استقلال شبکه مش محاسباتی، پنج شبکه با تعداد المان مختلف برای مخزن با همزن لنگری تولید شده است. سپس نمودار اندازه سرعت، نمودار سرعت مماسی و نمودار سرعت شعاعی روی فصل مشترک صفحه $Z - \theta$ به ازای θ برابر صفر درجه و صفحه $y = 0.045$ m جهت بررسی استقلال شبکه محاسبه شده است، که در جدول (۱) آورده شده است. در این قسمت همزن



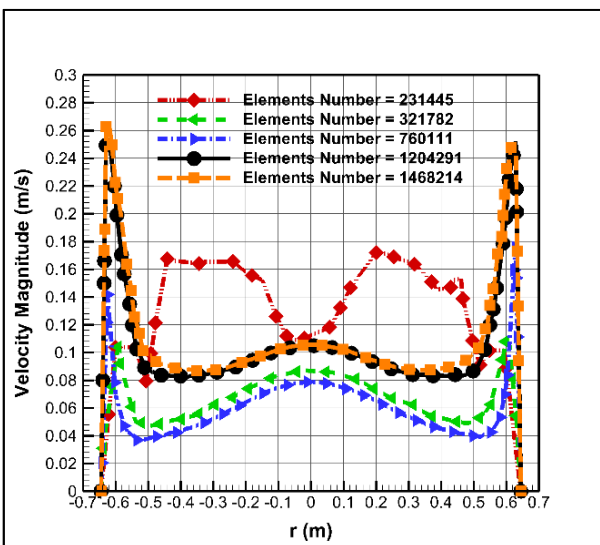
لنگری درون مخزن همراه با بافل به ازای سرعت پروانه ۶۰ دور در دقیقه شبیه‌سازی عددی شده است. همانطور که در نمودارهای شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود برای شبکه‌های شماره ۴ و ۵ با تعداد المان ۱۲۰۴۲۹۱ و ۱۴۶۸۲۱۴ تغییری در نمودارهای سرعت ایجاد نشده است. بنابراین شبکه شماره ۴ با تعداد ۱۲۰۴۲۹۱ به عنوان شبکه نهایی در نظر گرفته شده است. پس از استقلال شبکه برای هندسه مخزن دارای همزن لنگری، از اندازه المان مشابه برای هندسه‌های دیگر جهت شبیه‌سازی عددی استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات تولید شبکه محاسباتی برای هندسه مخزن دارای همزن لنگری همراه با بافل‌ها

شبکه	تعداد گره‌ها	تعداد سلول‌ها
۱	۴۲۴۸۱	۲۳۱۴۴۵
۲	۶۰۱۶۲	۳۲۱۷۸۲
۳	۱۴۳۲۳۳	۷۶۰۱۱۱
۴	۲۲۴۳۷۰	۱۲۰۴۲۹۱
۵	۲۷۳۱۱۵	۱۴۶۸۲۱۴



شکل ۶: بررسی استقلال شبکه با استفاده از نمودار سرعت شعاعی روی فصل مشترک صفحه $Z-\theta$ به ازای θ برابر صفر درجه و صفحه $y=0/045$ m



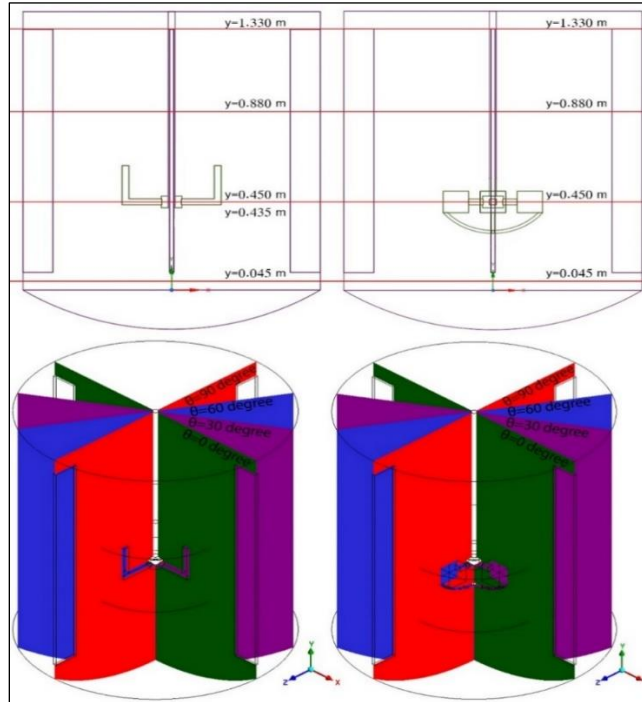
شکل ۵: بررسی استقلال شبکه با استفاده از نمودار سرعت مماسی روی فصل مشترک صفحه $Z-\theta$ به ازای θ برابر صفر درجه و صفحه $y=0/045$ m

نتایج حل عددی

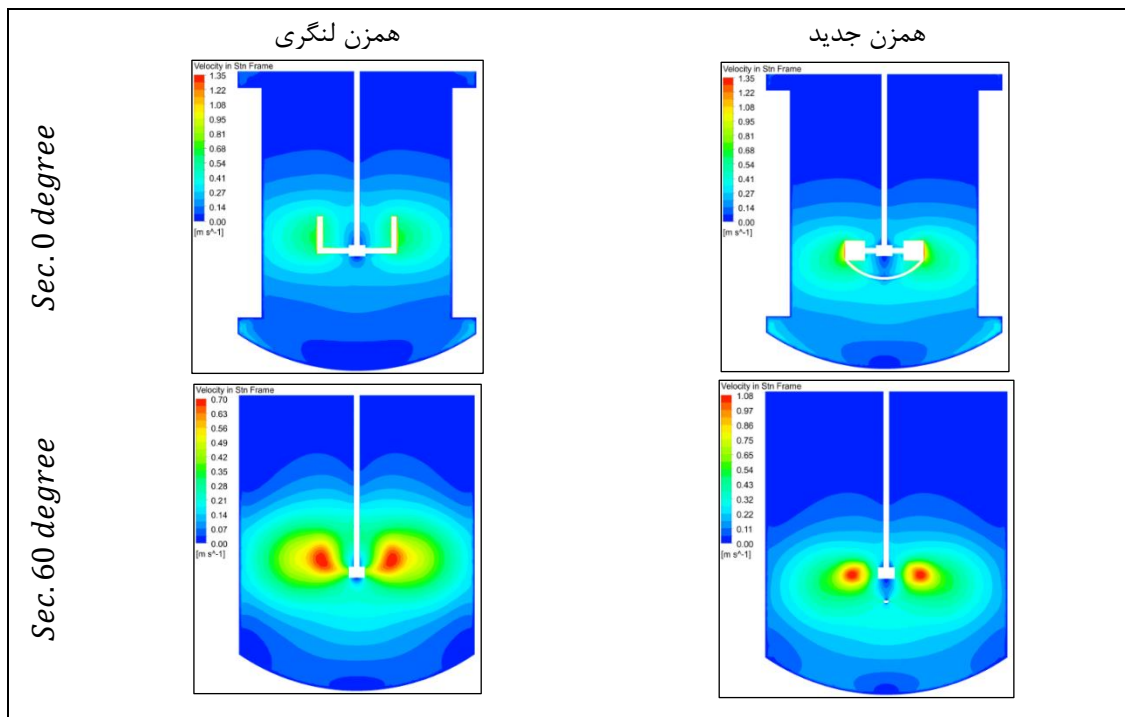
در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی میدان جریان درون یک مخزن همزن‌دار دارای بافل به ازای سرعت‌های زاویه‌ای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دور در دقیقه بهره گرفته شده است. جهت بررسی دقیق نتایج، صفحات مختلف $Z-\theta$ و $Z-X$ روی هندسه حل در نظر گرفته شده است و نتایج روی این صفحات بررسی می‌شود. صفحات $Z-\theta$ به ازای θ برابر ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه می‌باشد. همچنین صفحات $Z-X$ به ازای y برابر با ۰/۰۴۵، ۰/۴۵۰، ۰/۸۸۰ و ۱/۳۳۰ در نظر گرفته شده که در شکل (۷) نمایش داده شده است. در ادامه نتایج



حل برای بررسی دقیق الگوی جریان در همزن لنگری و همزن جدید آورده شده و در شکل (۸) کانتور سرعت برای همزن لنگری و همزن جدید در سرعت ۶۰ دور در دقیقه نشان داده شده است.



شکل ۷: صفحات $\theta - z$ و $x - z$ جهت ارائه نتایج روی این صفحات

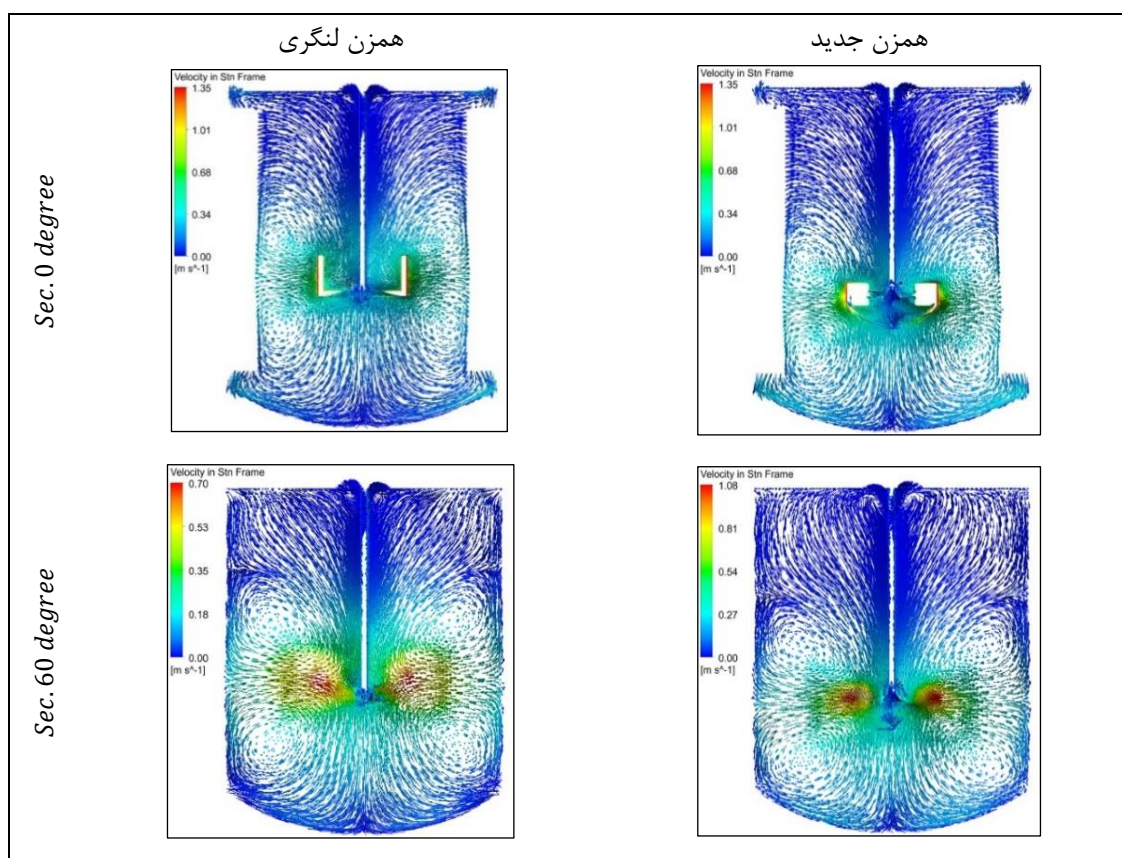


شکل ۸: کانتور سرعت برای همزن لنگری و همزن جدید در سرعت ۶۰ دور در دقیقه

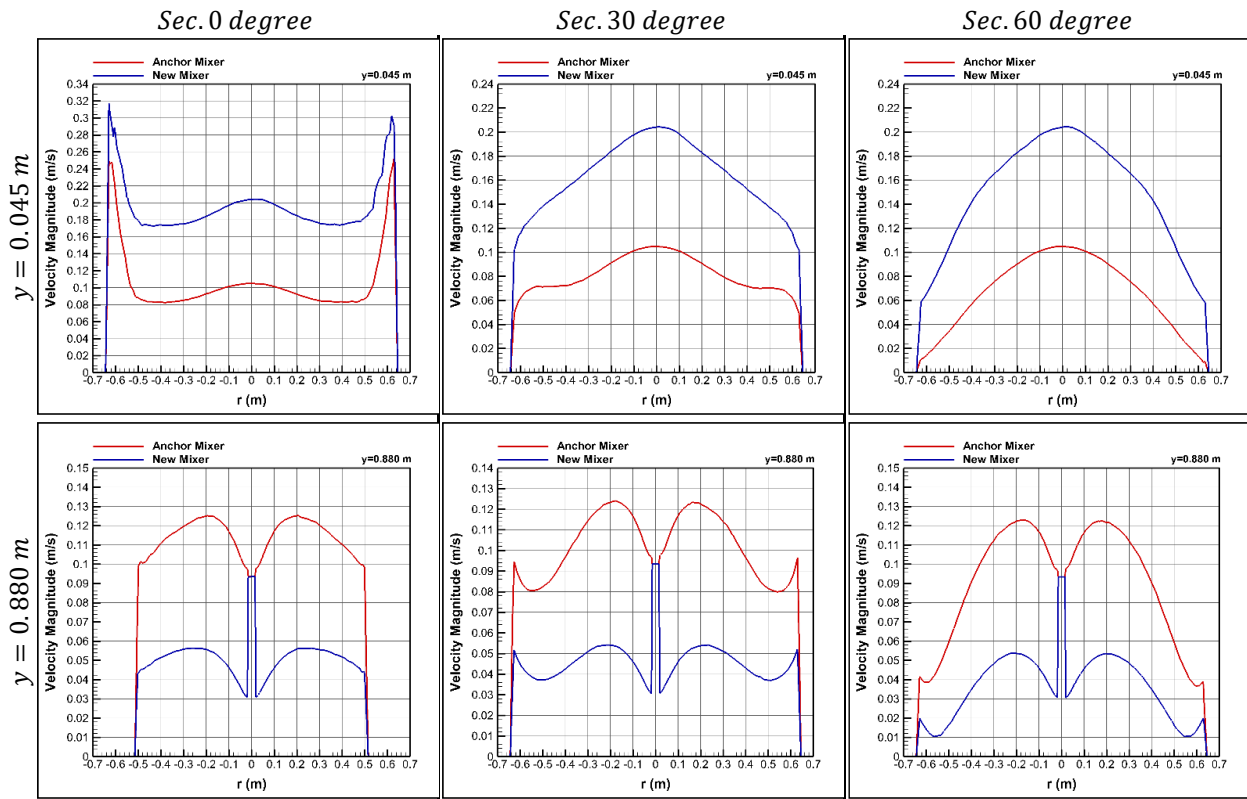


همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود عملکرد همزن جدید به ازای مقدار $\theta = 0^\circ$ بهتر از همزن لنگری بوده و نواحی پرسرعت بیشتری برای این میکسر وجود دارد ولیکن به ازای $\theta = 60^\circ$ عملکرد همزن لنگری بهتر از عملکرد همزن جدید است. توزیع جریان و شدت آشفتگی برای همزن لنگری بیشتر است. در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، که عملکرد همزن جدید به ازای مقدار $\theta = 0^\circ$ بهتر از همزن لنگری بوده و نواحی پرسرعت بیشتری برای این میکسر وجود دارد. گردابه‌های بزرگتری تشکیل شده ولیکن به ازای $\theta = 60^\circ$ عملکرد همزن لنگری بهتر از عملکرد همزن جدید است. توزیع جریان و شدت آشفتگی برای همزن لنگری در این ناحیه بیشتر است.

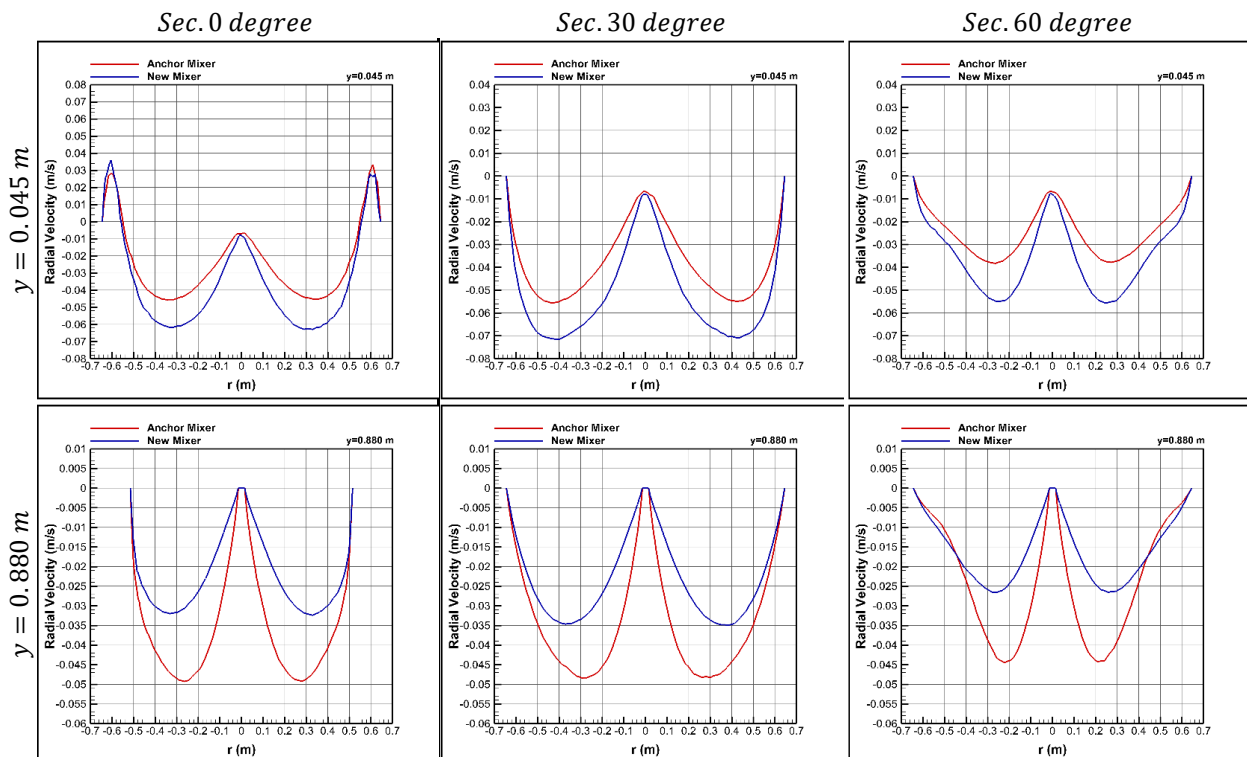
همانگونه که در نمودار شکل (۱۰) نشان داده شده، سرعت همزن جدید و همزن لنگری به ازای مقادیر $y=0/045$ m و m بررسی شد. در نزدیکی کف مخزن و مقدار اولیه y نمودار سرعت همزن جدید پروانه‌ها عملکرد بهتری داشتند ولیکن در نزدیکی سطح آزاد مقدار ثانویه y عملکرد همزن لنگری بهتر است. نمودار شکل (۱۱) سرعت شعاعی همزن جدید و همزن لنگری به ازای مقادیر $y=0/045$ m و $y=0/088$ m را نشان می‌دهد که همانند نمودار سرعت مماسی در نزدیکی کف مخزن و مقدار اولیه y نمودار سرعت همزن لنگری پروانه‌ها عملکرد بهتری داشتند ولی در نزدیکی سطح آزاد مقدار ثانویه y عملکرد همزن جدید بهتر است.



شکل ۹: بردارهای سرعت برای همزن لنگری و همزن جدید در سرعت ۶۰ دور در دقیقه



شکل ۱۰: نمودار اندازه سرعت برای همزن لنگری و همزن جدید در سرعت ۶۰ دور در دقیقه



شکل ۱۱: نمودار سرعت شعاعی برای همزن لنگری و همزن جدید در سرعت ۶۰ دور در دقیقه



نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای شبکه‌بندی از تولید شبکه بدون سازمان استفاده شد که میانگین کیفیت شبکه، نسبت منظری و کشیدگی برای شبکه محاسباتی مخزن دارای همزن لنگری ۰/۸۴، ۱/۸۴ و ۰/۲۲ بدست آمد. میانگین کیفیت شبکه، نسبت منظری و کشیدگی برای شبکه محاسباتی مخزن بافل‌دار و همزن جدید ۰/۸۴، ۱/۸۴ و ۰/۲۳ بدست آمد. در این پژوهش، میدان جریان درون یک مخزن همزن‌دار دارای بافل به ازای سرعت‌های زاویه‌ای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دور در دقیقه برای دو نوع همزن شبیه‌سازی شد. نتایج روی صفحات $z - \theta$ به ازای θ برابر ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و همچنین صفحات $z - x$ به ازای y برابر با ۰/۴۵، ۰/۴۵ و ۰/۸۸۰ و ۱/۳۳۰ بررسی شد. مشخص گردید حداکثر سرعت در نزدیکی پره‌های پروانه می‌باشد و در این محدوده دنباله^۱ ایجاد می‌شود. در همزن جدید مناطق سرعت بالا نسبت به همزن لنگری بیشتر می‌باشد. بنابراین در نواحی نزدیک به پروانه، همزن جدید اختلاط بهتری نسبت به همزن لنگری دارد. با افزایش سرعت زاویه‌ای پروانه، عملکرد همزن‌ها بهبود می‌یابد و اختلاط بهتری صورت می‌گیرد. بررسی بردارهای سرعت نشان داد چهار ناحیه گردابه قوی در نزدیک پروانه تشکیل شده است و در هر طرف دو حلقه یکی در پایین و دیگری در بالای همزن ایجاد گردید. جت اول به سمت پایین مخزن گردش می‌کند و سپس به ناحیه پروانه باز می‌گردد. جت دوم سیال نیز در جهت رو به بالا گردش می‌کند. در همزن جدید مناطق با سرعت زیاد در فاصله کف مخزن تا پروانه نسبت به همزن لنگری بیشتر است. در واقع اندازه سرعت تقریباً دو برابر همزن لنگری می‌باشد. بنابراین همزن جدید در نواحی کف مخزن عملکرد بسیار بهتری نسبت به همزن لنگری دارد. پس همزن جدید برای اختلاط مواد جامد که امکان ته‌نشینی مواد وجود دارد عملکرد بهتری دارد. در فواصل دورتر از کف مخزن، مخزن دارای همزن لنگری اختلاط بهتری نسبت به همزن جدید دارد.

مراجع

- [1] Rajavathsavai, D., Khapre, A., Munshi, B., (2014). Study of mixing behavior of cstr using CFD. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31, pp 119-129.
- [2] Márquez-Baños, V. E., Aarón, D., Valencia-López, J. J., López-Yañez, A., Ramírez-Muñoz, J., (2019). Shear rate and direct numerical calculation of the Metzner-Otto constant for a pitched blade turbine. Journal of Food Engineering, 257, pp 10-18.
- [3] Li, L., Xiang, K., Xiang, B., (2020). Numerical simulation of transient power consumption characteristics in an unbaffled stirred tank. Chemical Papers, 74, pp 2849-2859.
- [4] Zhang, P., Chen, G., Duan, J., Wang, W., (2018). Mixing characteristics in a vessel equipped with cylindrical stirrer. Results in Physics, 10, pp 699-705.
- [5] Davoody, M., Graham, L. J., Wu, J., Witt, P. J., Madapusi, S., Parthasarathy, R., (2019). Mitigation of scale formation in unbaffled stirred tanks-experimental assessment and quantification. Chemical Engineering Research and Design, 146, pp 11-21.
- [6] Bliatsiou, C., Malik, A., Böhm, L., Kraume, M., (2018). Influence of impeller geometry on hydromechanical stress in stirred liquid/liquid dispersions. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(7), pp 2537-2550.
- [7] Fluent, A. N. S. Y. S., (2013). ANSYS fluent theory guide 15.0. ANSYS, Canonsburg, PA 33.
- [8] Basavarajappa, M., Draper, T., Toth, P., Ring, T. A., Miskovic, S., (2015). Numerical and experimental investigation of single phase flow characteristics in stirred tanks using Rushton turbine and flotation impeller. Minerals Engineering, 83, pp 156-167.

¹ wake